

文章编号: 1672-8785(2019)09-0023-05

## 束流强度分布与膜厚的关系

李 震 王文燕 强 宇 王 丛 高 达

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘 要:** 为了验证束流强度分布对膜厚的影响, 通过束流分布的理论计算模拟出外延膜的分布, 并与外延实验样品数据进行了对比, 结果证实了我们的猜测, 可以部分解释膜厚分布不均的情况。利用公式计算束流强度的分布, 得出最薄点应为最厚点的 73.26%。实验测试的膜厚的最厚点为 8.1582  $\mu\text{m}$ , 最薄点为 5.9362  $\mu\text{m}$ , 比例为 72.76%, 与计算结果基本相符。因此, 可以确定束流强度分布对膜厚有一定的影响。但实际材料的膜厚不仅受束流分布的影响, 还与其他工艺参数相关。由于采用了理论计算与实验相互对比的方法, 比单纯实验所得出的结果更准确可靠。

**关键词:** MBE; 硅基衬底; 束流分布

**中图分类号:** TN302 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.09.005

## Relationship Between Beam Intensity Distribution and Film Thickness

LI Zhen, WANG Wen-yan, QIANG Yu, WANG Cong, GAO Da

(North China Institute of Optoelectronic Technology, Beijing 100015, China)

**Abstract:** In order to verify the influence of beam intensity distribution on film thickness, the distribution of epitaxial film was simulated by theoretical calculation of beam current distribution, and the data were compared with the samples of epitaxial experiment. The results confirmed our guess, which can partially explain the uneven distribution of film thickness. Using the formula to calculate the distribution of beam intensity, the thinnest point should be 73.26% of the thickest point. While the thickest point of the experimentally tested film thickness was 8.1582  $\mu\text{m}$ , the thinnest point was 5.9362  $\mu\text{m}$ , the ratio was 72.76%, which was basically consistent with the calculation results. Therefore, it can be determined that the beam intensity distribution has a certain influence on the film thickness. However, the film thickness of the actual material is not only affected by the beam distribution, but also related to other process parameters. Due to the comparison between theoretical calculations and experiments, the results obtained are more accurate and reliable than those obtained by simple experiments.

**Key words:** MBE; silicon substrate; beam distribution

收稿日期: 2019-08-13

作者简介: 李震(1995-), 男, 北京人, 本科, 助理工程师, 主要研究分子束外延硅基工艺。

E-mail: liyuif@163.com

## 0 引言

在现代红外探测技术中, 碲镉汞材料凭借其优异的性能、巨大的探测波段覆盖范围成为红外探测领域主流的红外材料。碲镉汞探测器材料一般使用液相外延(Liquid Phase Epitaxial, LPE)和分子束外延(Molecular Beam Epitaxy, MBE)方法生长, 特别是在三代大面阵、双多色红外材料的制备中对于多层异质结构中各层厚度、组分和掺杂浓度的精确控制, MBE 展现出了在复合衬底生长时上无以伦比的技术优势<sup>[1-2]</sup>。MBE 与其他薄膜生长技术相比具有更多的优点, 生长的外延膜杂质少、纯度高、可精确控制生长单原子层的厚度, 可任意改变外延层组分与掺杂浓度, 能够利用高能电子衍射仪(Reflection High-Energy Electron Diffraction, RHEED)实时观测生长状态等, 也可以使用不同的替代衬底(硅、锗、砷化镓、铟化镓、铟化铟等), 解决传统碲镉汞衬底无法获得高质量、大尺寸衬底的短板<sup>[3-5]</sup>。硅替代衬底由于易得大尺寸衬底, 机械强度高, 红外透过率高, 热膨胀系数与读出电路热匹配等原因, 是我们研究的主要衬底材料<sup>[4]</sup>。

衬底尺寸的变大带来材料外延均匀性的问题。该问题与复合加热器中加热盘的加热均匀性、大尺寸材料在无钢钼托的形变以及束流的分布<sup>[6-7]</sup>等方面有关。本篇论文就束流的分布展开研究讨论。

## 1 分析

硅基衬底的外延生长采用单束流源外延工艺, 且束流源的位置并不是位于外延衬底的正下方, 而是与其成一定角度放置。因此, 想要知道外延片的膜厚分布就需要对束流强度进行分析, 对束流分布进行研究, 寻找合适的方法进行外延, 才不会造成膜厚分布不均的问题。为了研究束流的分布, 我们设计外延实验, 在操纵器不旋转的条件下, 进行衬底外延, 观察衬底的外延厚度的分布情况。我们发现, 如果操纵器不旋转, 那么外延后的复合衬底呈现明

显的膜厚分布。区域差值可达  $2\ \mu\text{m}$ , 对平均膜厚  $6\sim 8\ \mu\text{m}$  的复合衬底材料来说, 这是巨大的差异。

下面将从束流强度的分布对外延膜厚的影响方面对此现象进行解释。

## 2 实验结果

根据文献资料我们可以得到束流强度在衬底表面分布的近似公式。在理想模型中, 假设外延衬底表面正对束流源炉口, 衬底表面法线和炉口平面法线平行, 炉口中心线与衬底相交于 A 点, 如图 1 所示。其在衬底表面的束流强度分布遵循的公式为<sup>[8-9]</sup>

$$I_A = 1.118 \times 10^{22} \cdot \frac{PA_e}{r_A^2 \sqrt{MT}} (\text{mol} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (1)$$

式中,  $P$  为蒸汽压,  $A_e$  为束流源炉口的面积,  $r_A$  为衬底中心与束流炉口的距离,  $M$  为分子量,  $T$  为束源炉的温度。

在衬底表面偏离中心的 B 点, 束流强度  $I_B$  为

$$I_B = I_A \cos^4 \theta \quad (2)$$

式中,  $\theta$  是从束源炉口中心到 B 点的方向与到 A 点方向的夹角。

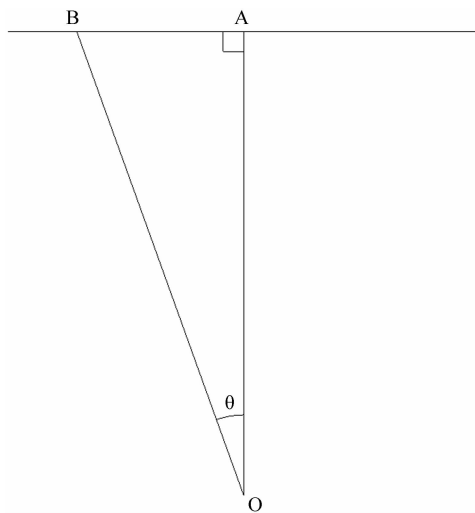


图 1 束流与衬底的示意图

在实验外延中, 束源炉口的法线方向与衬底的法线方向并不一致, 如图 2 所示。设倾斜角度为  $\varphi$ , 于是衬底中心点 A 和偏离中心点 B

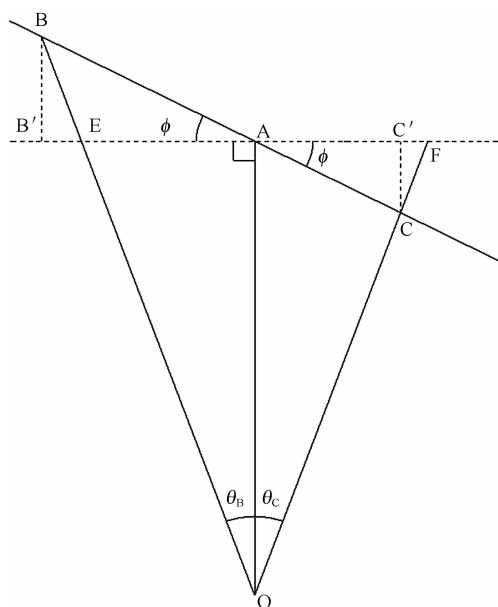


图 2 实际外延束流与衬底的示意图

的束流强度分别为

$$I'_A = I_A \cos \phi \quad (3)$$

$$I'_B = I_A r_A^2 / r_B^2 \cos \theta_B \cos(\phi + \theta_B) \quad (4)$$

同理, 偏离中心点 C 的束流强度为

$$I'_C = I_A r_A^2 / r_C^2 \cos \theta_C \cos(\phi + \theta_C) \quad (5)$$

式中,  $r_A$  为束源炉口到衬底中心点 A 点的距离,  $r_B$  为束源炉口到偏离中心点 B 的距离,  $\theta_B$  为束源炉口中心到 B 点的方向与到 A 点方向的夹角, 同理可知  $r_C$  和  $\theta_C$ 。

在图 2 中,  $r_A = OA$ ,  $r_B = OB$ ,  $r'_B = AB$ 。 $r'_B$  为偏离中心点 B 到衬底中心点 A 的距离, 同理可知  $r'_C$ 。

根据三角几何函数关系,

$$OB = OE + EB = OA / \cos \theta_B + BB' / \cos \theta_B = (OA + AB \sin \phi) / \cos \theta_B = (r_A + r'_B \sin \phi) / \cos \theta_B$$

即

$$r_B = (r_A + r'_B \sin \phi) / \cos \theta_B \quad (6)$$

又

$$AE = AB' - B'E = r'_B \cos \phi - r'_B \sin \phi \tan \theta_B$$

以上两式联立得

$$r'_B \cos \phi - r'_B \sin \phi \tan \theta_B = r_A \tan \theta_B$$

变形得

$$r_A + r'_B \sin \phi = \frac{r'_B \cos \phi}{\tan \theta_B} \quad (7)$$

$$\tan \theta_B = \frac{r'_B \cos \phi}{r_A + r'_B \sin \phi} \quad (8)$$

根据式(6)和(7):

$$r_B = \frac{r'_B \cos \phi}{\sin \theta_B} \quad (9)$$

同理:

$$\tan \theta_C = \frac{r'_C \cos \phi}{r_A - r'_C \sin \phi} \quad (10)$$

$$r_C = \frac{r'_C \cos \phi}{\sin \theta_C} \quad (11)$$

联立式(4)和(5)可得:

$$I'_B / I'_C =$$

$$[I_A r_A^2 / r_B^2 \cos \theta_B \cos(\phi + \theta_B)] / [I_A r_A^2 / r_C^2 \cos \theta_C \cos(\phi + \theta_C)] \\ = (r_C^2 / r_B^2) \cdot [\cos \theta_B \cos(\phi + \theta_B) / \cos \theta_C \cos(\phi + \theta_C)]$$

又依据式(9)和(11):

$$r_C^2 / r_B^2 = (r'_C \cos \phi \sin \theta_B)^2 / (r'_B \cos \phi \sin \theta_C)^2 \\ = (r'_C \sin \theta_B)^2 / (r'_B \sin \theta_C)^2$$

所以

$$I'_B / I'_C = \frac{r_C^2 \sin^2 \theta_B \cos \theta_B \cos(\phi + \theta_B)}{r_B^2 \sin^2 \theta_C \cos \theta_C \cos(\phi + \theta_C)} \quad (12)$$

我们计算沿着束流的方向, 3 in 外延衬底的最近端 C 和最远端 B 的束流大小, 即  $r'_B = r'_C = 35$  mm,  $r_A = 300$  mm,  $\phi = 45^\circ$ 。

根据式(8)和(10), 可解得  $\theta_B = 4.36^\circ$  和  $\theta_C = 5.14^\circ$ 。将其代入式(12), 可得:

$$I'_B / I'_C = \frac{\sin^2 \theta_B \cos \theta_B \cos(\frac{\pi}{2} + \theta_B)}{\sin^2 \theta_C \cos \theta_C \cos(\frac{\pi}{2} + \theta_C)} \\ = \frac{\sin^2 \theta_B \cos \theta_B (\cos \theta_B - \sin \theta_B)}{\sin^2 \theta_C \cos \theta_C (\cos \theta_C - \sin \theta_C)} \\ = \frac{0.0053080}{0.0072457} = 0.7326 = 73.26\%$$

可以看出, B 点的束流强度是 C 点的 73.26%。假设在不旋转的情况下, 膜厚只受束流强度分布的影响, 那么 B 的膜厚应该是 C 点膜厚的 73.26%。

我们以实际外延的复合衬底厚度验证一下。如图 3 所示, 在实际外延中使用 MBE 设备在 Si(211)B 基衬底上生长 CdTe 薄膜, 并在生长 CdTe 前生长 ZnTe 过度层, 之后生长所

表 1 不旋转时样品膜厚的测试结果

| 步长(mm) | X=12.7 | X=25.4 | X=38.1 | X=50.8 | X=63.5 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Y=63.5 |        | 7.5664 | 7.8936 | 8.1582 |        |
| Y=50.8 | 6.7922 | 7.1584 | 7.4506 | 7.6859 | 7.8511 |
| Y=38.1 | 6.4331 | 6.6987 | 7.0207 | 7.1937 | 7.3753 |
| Y=25.4 | 6.0594 | 6.3492 | 6.5780 | 6.7296 | 6.8883 |
| Y=12.7 |        | 5.9362 | 6.1358 | 6.3217 |        |

表 2 旋转时样品膜厚测试结果

| 步长(mm) | X=12.7 | X=25.4 | X=38.1 | X=50.8 | X=63.5 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Y=63.5 |        | 5.5315 | 5.5737 | 5.5315 |        |
| Y=50.8 | 5.5525 | 5.6166 | 5.6601 | 5.6166 | 5.5737 |
| Y=38.1 | 5.5737 | 5.6601 | 5.7043 | 5.6601 | 5.5951 |
| Y=25.4 | 5.5951 | 5.6166 | 5.6601 | 5.6166 | 5.5737 |
| Y=12.7 |        | 5.5951 | 5.5951 | 5.5737 |        |

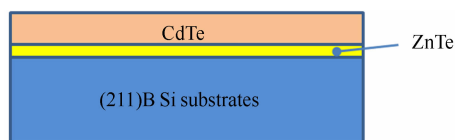


图 3 CdTe 薄膜的外延生长

需要的 CdTe 层的厚度。生长完成后,使用傅里叶红外光谱仪测试 CdTe 层有效外延区域的厚度,得出实际的外延生长结果。

为了外延结果的准确性,我们分别对不旋转和旋转时的样品进行了测试,测试结果见表 1 和表 2。表 1 为不旋转时样品膜厚的测试结果,表 2 为旋转时样品膜厚的测试结果。

外延膜最厚为  $8.1582\ \mu\text{m}$ ,最薄为  $5.9362\ \mu\text{m}$ ,比例为  $5.9362/8.1582=0.7276=72.76\%$ ,与本篇假设条件下计算的结果基本相符。从表 1 可看出,膜厚的分布趋势是从左下往右上逐渐变厚。所以在厚的地方束流强度高,在薄的地方束流强度低,厚度相差很大。作为对比,我们对表 2 在旋转时样品膜厚的测试结果进行分析。可以明显地看出,在旋转生长后样品的厚度最多相差  $0.17\ \mu\text{m}$ ,这与不旋转时的厚度  $2.22\ \mu\text{m}$  相差极大。计算两个样品厚度的标准偏差,不旋转时为  $0.6482$ ,旋转时为  $0.0455$ 。两次测试结果表明,束流强度分布对于薄膜材料厚度的影响很大。因此在实际外延生长中,控制束流分布是对提升薄膜质量的一大关键点。

### 3 总结

通过束流分布的理论计算模拟出外延膜的分布,并与外延实验的样品进行了数据对比。由结果可发现,束流分布对膜厚有一定的影响。据此可以半定量地解释膜厚分布不均的情况,给出部分点对点之间的数值相对关系;但对材料整体的膜厚分布无法给出全面准确的数值模拟。实际的外延材料膜厚不仅受束流分布的影响,还与其他工艺参数相关。所以,还需进一步研究,才可以使生长的外延薄膜达到最佳的使用效果。

### 参考文献

- [1] 王丛,刘铭,王经纬,等. MBE 外延 InSb 基 CdTe 工艺研究 [J]. 激光与红外, 2017, 47(4): 474-478.
- [2] 王经纬,高达. Si 基短波碲镉汞材料分子束外延生长研究 [J]. 激光与红外, 2015, 45(6): 646-649.
- [3] 史衍丽. 第三代红外探测器的发展与选择 [J]. 红外技术, 2013, 35(1): 1-8.
- [4] 周立庆,刘铭,巩锋,等. 3 英寸 CdTe/Si 复合衬底外延技术研究 [J]. 激光与红外, 2011, 41(5): 537-541.
- [5] 巩锋,周立庆,王经纬,等. 3 英寸 Si 基碲镉汞分子束外延工艺研究 [J]. 激光与红外,

- 2012, **42**(7): 781–785.
- [6] 孙士文, 刘从峰, 方维政, 等. 采用不同材料坩埚对碲锌镉晶体质量的影响 [J]. *激光与红外*, 2007, **37**(S1): 924–927.
- [7] 陈路, 巫艳, 于梅芳, 等. 分子束外延生长 3 英寸 HgCdTe 晶片 [J]. *红外与毫米波学报*, 2002, **21**(1): 67–70.
- [8] Noshov B Z, Zepeda-Ruiz L A, Pelzel R I, et al. Surface Morphology in InAs/GaAs(111) A Heteroepitaxy: Experimental Measurements and Computer Simulations [J]. *Applied Physics Letters*, 1999, **75**(6): 829.
- [9] 分子束外延设备研制组. 分子束外延设备 [J]. *仪器仪表学报*, 1981, **2**(4): 96–98.